

謎に包まれる3番目の生体運動—アーキアの遊泳運動—

木下 佳昭

生き物らしさとは何だろうか？自己増殖や代謝はもちろんのこと、動くことは生物、特に動物や微生物にとって重要な生命現象の一つであろう。

生き物の運動—すなわち生体運動は、分子機械と呼ばれる化学エネルギーを力学的な仕事に変換するモーターにより駆動される。世界中の生体運動研究者は、まるで人間が作り出したモーターかのような精巧な分子機械に魅了され、その仕組みに迫ってきた。これまでの主な研究対象は真核生物におけるミオシン・キネシン・ダイニンと、バクテリアにおけるべん毛運動であり、分子レベルでその作動機構が明らかとなってきた。しかし2010年以降、真核生物・バクテリアとともに自然界を構成するアーキアの生体運動の研究が盛んになりつつある。

アーキアは塩濃度が高い死海や熱噴出孔といった極限環境に多く見られる微生物である。大きさは5マイクロメートル程度 (10^{-3} ミリメートル程度) であり、丸いもの、桿状のもの、さらには三角のものまで存在する。多くのアーキアは細胞表面に太さ10ナノメートル (10^{-5} ミリメートル) のらせん状繊維を持つ。この繊維は複数のタンパク質から構成されるモーターと結びついており、両者をまとめてアーキアべん毛と呼ぶ¹⁾。アーキアべん毛のエネルギー源はATPであり、加水分解の際に生じるエネルギーを利用してモーターが回転する。これにより、アーキアは水中を自由に泳ぐことができる。留意していただきたいが、アーキアべん毛とバクテリアべん毛は構成するタンパク質がまったく異なる。英語では誤解を防ぐために、アーキアべん毛のことを Archaeum (Archaeal + Flagellum) と呼んでいる。

アーキアべん毛を構成するタンパク質は、種によって異なる。高度好塩菌を含むユーリアーキオータは複数の

繊維 (FlaA, FlaB) と、8つのタンパク質 (FlaC-J) からなるモーターを持つ (図1左)。一方で、高度好熱菌に代表されるクレンアーキオータは1種類の繊維 (FlaB) と、6つのタンパク質 (FlaF-J, FlaX) からなるモーターを持つ (図1右)。今のところ、何故ユーリアーキオータのみ複数の繊維を持つのかわかっていないが、べん毛繊維を複数持つことで運動性を制御しているようである²⁾。また、ユーリアーキオータはバクテリアから水平伝播により化学走性を獲得し、方向性のある運動を示す³⁾。しかし、化学走性物質がモーターのどのタンパク質と相互作用し、回転方向を制御するのかわかっていない。そもそも化学走性物質がない場合、どちらの方向にモーターが回転しているかさえ不明瞭である。また、運動に関係する役者もでそろってきたが、半数以上の機能が謎のままである。

機能に関しては不明なことが多く残されているが、2016年以降、構造の情報が集積しつつある。クライオ電子顕微鏡という2017年度のノーベル化学賞を受賞した技術によるものである。繊維やモーターの結晶構造が解かれ、モーターの全体像まで明らかとなったのである^{4,5)}。アーキアのタンパク質は高温でも安定しており、タンパク質の結晶構造解析により構造の情報を今後さらに得ることができるだろう。構造情報に対して、機能の側面がどれだけ明らかになるかが課題であるが、生物物理学者の今後の貢献に期待したい。

最後に生物工学の視点から応用例について述べたい。膜小胞にバクテリアのべん毛を取り付けたドラッグデリバリーシステムがこれまでに考えられているが、べん毛自身がToll様受容体5を介した免疫系に認識・攻撃される問題点が存在した。一方で、アーキアのべん毛はバクテリアと異なり病原性と関係がない。もしかしたら、アーキアのべん毛は免疫系に認識されず、有効な薬剤を生体内に送り届けることのできるシステムとして今後利用できるかもしれない。

もし本稿によりアーキアの運動やバクテリアの運動に興味を持った読者がおられたら、生物物理学会のビデオライブラリーを閲覧していただきたい。

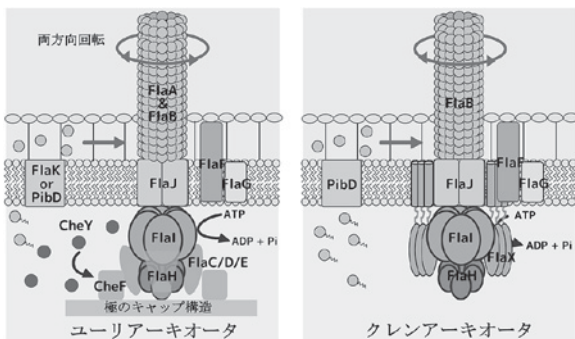


図1. アーキアべん毛の模式図

- 1) Jarell, K. F. and Albers, S. V.: *Trends in Microbiol.*, **20**, 307 (2012).
- 2) Tripepi, M. et al.: *Microbiology*, **159**, 2249 (2013).
- 3) Briegel, A. et al.: *Environ. Microbiol. Rep.*, **7**, 414 (2015).
- 4) Poweleit, N. et al.: *Nat. Microbiol.*, **2**, 16222 (2016).
- 5) Daum, B. et al.: *Elife*, **6**, e27470 (2017).